宁夏近60 a大气环境容量变化特征及其影响因子

崔 洋[1,2], 王 岱[1,2], 高睿娜[1,2], 安兴琴[3]

(1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 宁夏 银川 750002; 2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002; 3. 中国气象科学研究院大气成分研究所, 北京 100081)

摘 要: 为研究宁夏大气环境容量变化及其影响因子,利用1961—2018年气象站逐日历史观测资料,根据箱模型原理对宁夏大气环境容量A(污染物排放总量控制系数)值时空分布及其主要气象影响因子进行分析,并对2018年大气环境容量进行区划评估。结果表明:宁夏各季节大气环境容量A值总体呈减小趋势,速率为$-0.47\times10^4 \sim -0.24\times10^4 km^2\cdot(10a)^{-1}$。各季节$A$值夏季最大,春季次之,秋季和冬季较小。月$A$值呈单峰型变化,8月最大、12月最小,空间上呈南高北低的分布特点。受贺兰山、六盘山地形及区域降水量等因素影响,A值低值中心位于银川市和石嘴山市,高值中心位于固原市南部地区。风速和混合层高度变化对宁夏大气环境容量A值年代际演变趋势具有决定影响;降水和风速对其影响存在明显季节和地区差异,风速对北部春季A值贡献较大,降水对中南部夏秋季A值贡献较大。受冶金、火电、化工、建筑等高耗能产业和车辆排放影响,平罗县和利通区属于宁夏大气环境SO_2、NO_x临界及以下等级承载区,利通区以南各地为高承载区。

关键词: 大气环境容量; 大气环境承载力指数; 气象影响因子; 剩余容量; 宁夏

随着经济社会迅速发展,煤炭、石油、天然气等能源消耗量不断增加,大气环境质量已成为我国公众关注的热点问题。大气环境容量研究是科学制定某一区域大气总量控制目标、合理利用有限的大气环境容量资源和改善大气环境质量的基础。自20世纪60年代日本为应对环境污染问题提出大气环境容量概念以来[1],加拿大[2]、印度[3]、土耳其[4]、瑞士[5]等国家已将其用于大气环境污染、质量标准制定和污染防治研究,为本国环境管理部门科学制定大气环境污染防控方案政策提供基础支撑。我国自20世纪90年代末开始对大气环境容量进行研究[6-7],并取得了一些研究成果。徐大海等[8-10]基于箱模式理论将大气环境容量定义为在一定空气体积和时段内,当某种污染物在给定平均浓度水平上,其产生量和清除量达到平衡状态时的大气污染物容量;安兴琴等[11]通过数值模拟方法模拟出了SO_2的浓度分布及每个污染单元对于地面浓度的分担率;孙文杰[12]在大气环境容量研究中引入了反映污染物动态变化的环境变动量;朱蓉等[13]根据大气自身所具有的对大气污染物的通风稀释和湿清除能力,给出了基于常规气象观测的大气自净能力指数计算方法。简单来说,大气环境容量就是某一地区在某时段内,大气环境所能承纳的大气污染物的最大排放量。它能够客观定量地表征大气对污染物承载能力的变化,大气环境容量越小,表明当前大气环境对污染物的清除能力越差,反之亦然。

大气环境容量不仅与污染物排放有关,而且与气象条件也密切相关。气象条件主要通过污染物的输送扩散、干湿沉积以及各种化学清除与转化过程对大气环境容量产生影响。其中,边界层逆温有利于重度雾霾的发生及增强[14];逆温较强,边界层高度较低,近地面湍流得不到充分发展,不利于污染物扩散[15];秋冬季的局地高温、高湿及小风环境有利于淮安市[16]、常州市[17]重度污染天气的形成。500 hPa高空处于高压脊前西北偏西气流中,地面位于弱高气压场区及低压场(倒槽)区,廊坊市易出现连续重污染天气过程[18]。温度低、风速小、相对湿度大、逆温天气是造成乌鲁木齐市采暖期颗粒物污

收稿日期: 2022-10-31; **修订日期:** 2023-01-01
基金项目: 宁夏自然科学优秀青年基金(2022AAC05065);宁夏自然科学基金(2019AAC03252);宁夏重点研发计划重点项目(2022BEG02010)共同资助
作者简介: 崔洋(1982-),男,正高级工程师,博士,主要从事气候变化、大气边界层研究. E-mail: cuiyang@cma.gov.cn
885-895页

染严重的重要原因[19]。降水湿清除是去除污染物的有效途径，风速直接影响污染物的扩散速度[20]。环境承载能力下降是造成区域环境空气质量下降的主要原因之一。21世纪以来宁夏各地污染物排放增多，大气环境质量明显下降。因有关大气环境容量变化研究工作的缺失，宁夏各地大气环境污染防治措施效果一般。同时，全球变化背景下，宁夏各地降水、风速等气象因子的时空分布格局也发生了明显改变。因此，本研究利用气象、环境质量历史数据，计算大气环境容量*A*值，分析宁夏大气环境容量时空变化特征，研究气象因子对*A*值的影响，探讨大气污染物承载能力变化，以期为黄河流域生态保护和高质量发展先行区建设提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 数据来源

根据资料的连续性和完整性，选用宁夏11个国家气象站1961年1月1日至2018年12月31日逐日定时观测资料，要素包括：云量（总云量、低云量）、风速、降水量。为便于大气环境容量相关参数计算，风速、云量数据选取每日02:00、08:00、14:00、20:00 4个时次，降水量为逐月数据。5个地市站点分布情况如图1所示，文中所有区域特征的描述均用站名。污染物浓度数据为5个地级市城区环境质量监测站逐日数据，大气污染物排放量数据来自《宁夏统计年鉴（2018）》。

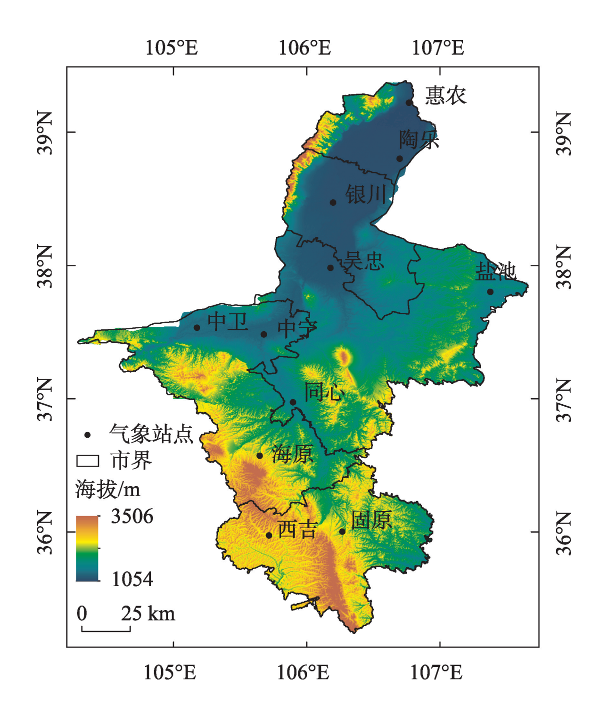


图1 研究区海拔地形与站点分布

Fig. 1 Terrain elevation and site distribution in the research area

1.2 研究方法

1.2.1 大气环境容量 根据《制定地方大气污染物排放标准的技术方法(GB/T 3840–91)》中有关大气污染物排放总量的估算方法及徐大海等[9-10]、朱蓉等[13]的研究成果，在长时间平衡条件下大气环境容量(*Q*)通常表示为：

$$Q = A \times \sqrt{S} \times C_S \tag{1}$$

式中：*A*表示污染物排放总量控制系数；*S*表示总量控制区总面积；C_S 表示污染物标准浓度界限。在公式(1)中，各地*S*为常量，C_S 为定值。可见，在不考虑区域污染物浓度变化的情况下，大气环境容量的变率主要取决于污染物排放总量控制系数*A*，即*A*的变化能反映出大气环境容量的变化。

为分析各地大气环境容量时空变化特征，给出*A*值的具体计算方法。公式如下：

$$A = 3.1536 \times 10^{-3} \times \left(\frac{\sqrt{\pi} V_E}{2} + W_r R \sqrt{S} \times 10^3\right) \tag{2}$$

式中：V_E 表示通风量（$m^2 \cdot s^{-1}$）；W_r 表示清洗比，取值 1.9×10^{-5}；*R*表示降水率（$mm \cdot a^{-1}$）。

1.2.2 通风量 通风量是表征边界层大气运动状态的参数[8]，理论上某时刻的通风量 V'_E 是通过公式(3)对从地面到混合层顶高度的风速进行积分获得[21]。

$$V'_E = \int_0^{H_i} u_i(z) dz = \int_0^{200} u_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^p dz + \int_{200}^{H_i} u_{10} \left(\frac{200}{10}\right)^p dz \tag{3}$$

式中：*z*表示离地高度（m）；$u_i(z)$ 表示高度*z*处的平均风速（$m \cdot s^{-1}$）。在实际科研工作中，一般利用10 m高度处的平均风速 u_{10}（$m \cdot s^{-1}$）和风速高度指数*p*来计算获得 V'_E。在具体计算过程中，当 $u_{10} \leq 6\ m \cdot s^{-1}$ 时，取实际风速值，当 $u_{10} > 6\ m \cdot s^{-1}$ 时，其值取 $6\ m \cdot s^{-1}$，*p*值的大小按照大气稳定度确定[22]。根据《城市大气污染物总量控制方法手册》[23]，利用逐时通风量 V'_E 通过公式(4)计算获得月和季节通风量 V_E。

$$V_E = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{V'_E}} \tag{4}$$

1.2.3 大气环境承载力指数 利用各地区域污染物浓度等观测数据，对大气环境容量进行合理性分析。在此基础上，参照资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术方法[24]，利用2018年宁夏11

站大气污染物浓度等观测数据,通过公式(5)计算各地环境承载力指数。

$$P_i = (E_i - Q_i)/Q_i \tag{5}$$

式中:P_i 表示大气环境承载力指数;E_i 表示 i 污染物的排放量;Q_i 表示 i 污染物的环境容量。大气环境承载力指数数值越低,表明大气环境容量越大。参考刘龙华等[25]的大气环境承载力指数等级划分方法,结合宁夏气候环境特点,将大气环境承载力划分为严重超载(>1)、超载(0~1)、临界超载(-0.4~0)、中等承载(-0.7~-0.4)和高承载(<-0.7)5个等级。

2　结果与分析

2.1　大气环境容量时空分布特征

宁夏月平均大气环境容量 A 值为 1.0×10^4 ~ 5.2×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$,总体呈单峰型变化,夏季7月最大,冬季12月最小(图2)。各市月 A 值在6—8月达到最大,均在12月达到最小。固原、中卫、吴忠、石嘴山、银川年 A 值分别为 1.0×10^4~6.5×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$、1.1×10^4~6.2×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$、1.0×10^4~4.2×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$、1.0×10^4~4.0×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$、0.7×10^4~2.4×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$,月变幅固原最大、银川最小。

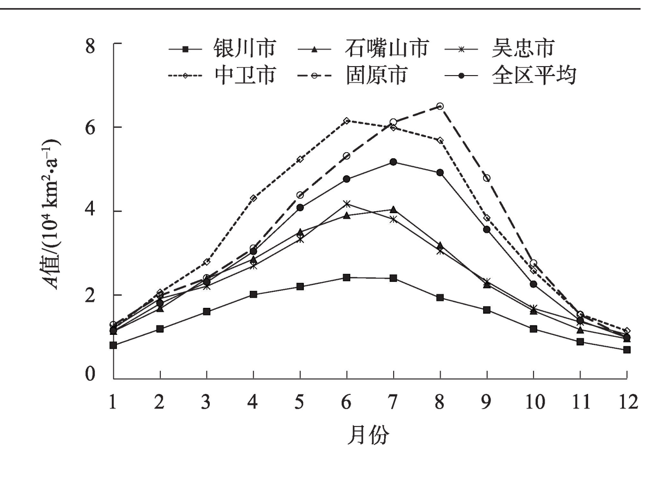


图2　1961—2018年宁夏平均逐月大气环境容量系数 A 变化

Fig. 2　Change of monthly average atmospheric environmental capacity coefficient A in Ningxia from 1961 to 2018

近60 a宁夏四季大气环境 A 值年际变化均较为明显,多年平均夏季最大(4.7×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$),春季次之(3.0×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$),秋季(2.3×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$)和冬季(1.1×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$)较小(图3)。春夏秋冬季 A 值总体上均呈下降趋势,速率分别为 -0.47×10^4 $km^2\cdot(10a)^{-1}$、-0.46×10^4 $km^2\cdot(10a)^{-1}$、-0.33×10^4 $km^2\cdot(10a)^{-1}$ 和 -0.24×10^4 $km^2\cdot(10a)^{-1}$,均通过了显著性水平检验($P\leq0.05$)。1961—2003年春夏冬季与秋季 A 值年代际变化间存在明显差异,前者呈"增加-减小-增加"变化特征,后者始终呈减小趋势。2004年四季 A 值出现断崖式减少,之后呈小幅度增大趋势。

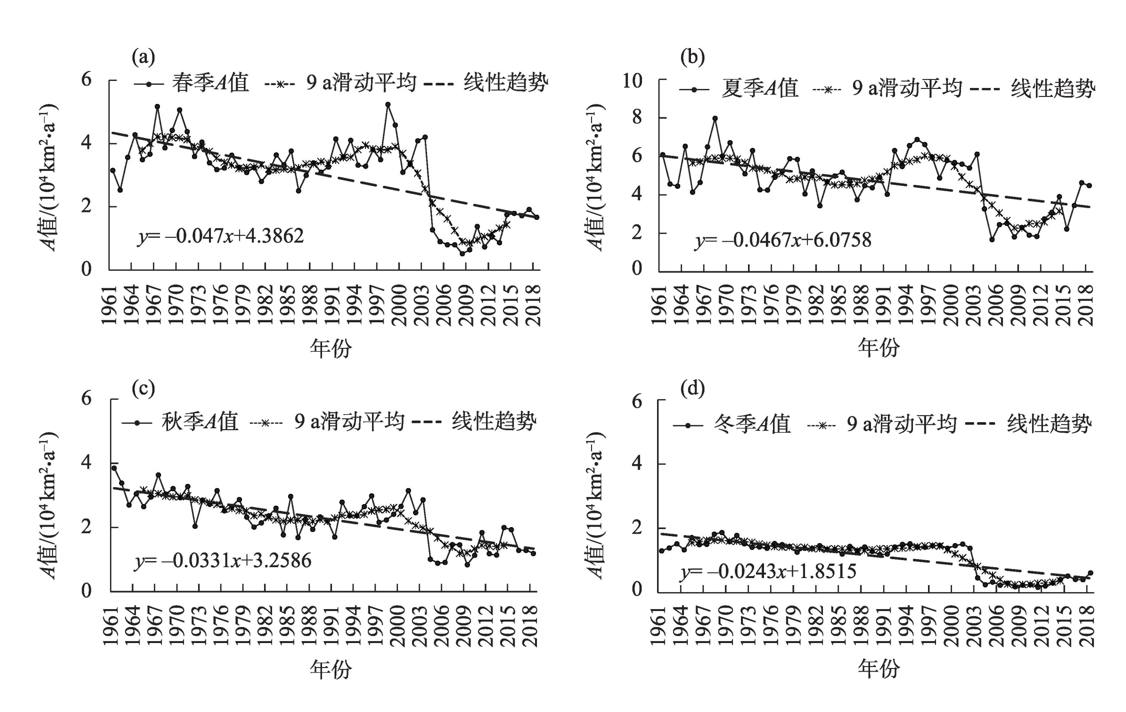


图3　1961—2018年宁夏春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)季大气环境容量系数 A 变化

Fig. 3　Change of atmospheric environmental capacity coefficient A in spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d) of Ningxia from 1961 to 2018

春季各地*A*值为1.8×10⁴~4.3×10⁴ km²·a⁻¹，吴忠以北及西吉在3.0×10⁴ km²·a⁻¹以下，其他地区在3.0×10⁴~4.3×10⁴ km²·a⁻¹之间，均呈显著减小趋势，通过了*P*≤0.05的显著性水平检验；其中惠农、中卫、中宁、盐池、海原、固原减小趋势为−0.72×10⁴~−0.45×10⁴ km²·(10a)⁻¹(图4a)。夏季各地*A*值差异较大，海原及固原以南地区在7.1×10⁴~8.0×10⁴ km²·a⁻¹之间，吴忠以北地区在2.1×10⁴~3.4×10⁴ km²·a⁻¹之间；各地*A*值减小趋势为−0.79×10⁴~−0.28×10⁴ km²·(10a)⁻¹，尤其惠农、吴忠、中宁、同心、海原减小趋势在0.45×10⁴ km²·(10a)⁻¹以上(图4b)。秋季石嘴山、银川*A*值在1.50×10⁴ km²·a⁻¹以下，为全区低值中心，其他大部地区在1.6×10⁴~3.5×10⁴ km²·a⁻¹之间，海原、固原南部为高值中心；全区*A*值均减小，趋势在−0.47×10⁴~−0.17×10⁴ km²·(10a)⁻¹之间，海原减小趋势最大(图4c)。冬季各地*A*值差异较小，除中宁为1.51×10⁴ km²·a⁻¹外，其他地区均在1.5×10⁴ km²·a⁻¹以下；各地*A*值减小趋势在−0.15×10⁴~0.30×10⁴ km²·(10a)⁻¹之间(图4d)。

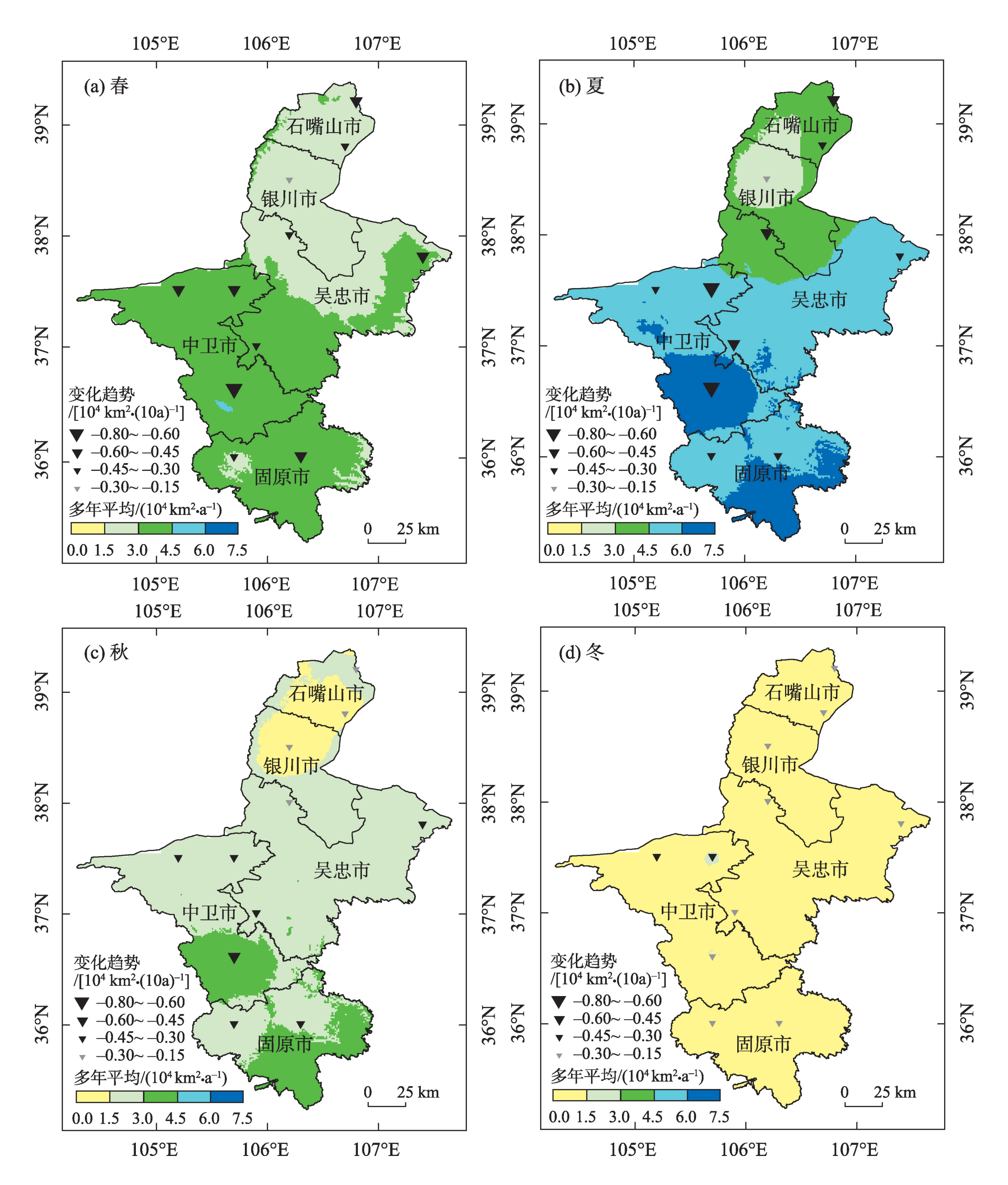


图4 1961—2018年宁夏春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)季平均大气环境容量系数*A*及其变化趋势分布

Fig. 4 Average atmospheric environmental capacity coefficient *A* and its change trend distribution in spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d) of Ningxia from 1961 to 2018

2.2 影响大气环境容量的气象要素分析

由计算公式(1)和(2)可知,输送扩散清除项和湿沉积清除项是决定大气环境容量的最主要因子,其中输送扩散清除项由风速和混合层高度计算的通风量表示,风速越大、混合层高度越高,越有利于大气污染物的湍流扩散,降水对大气污染物起到冲刷和湿沉降作用。为研究气象因子对宁夏大气环境容量时空变化的影响,对平均风速、混合层高度和降水量的时空特征及其与*A*值的关系进行分析。

近60 a宁夏平均风速总体呈减小趋势,年代际变化阶段性特征明显。各季节平均风速1988—1994年呈"增加-减小-增加"趋势,1994—2003年较平稳,2004年后出现断崖式减小,2012年后再次呈波动增大趋势(图5a),与*A*值变化特征基本一致,反映出其对*A*值年际变化具有决定性影响。春、夏季混合层高度2003年前总体呈平稳缓慢升高趋势,之后呈略微下降趋势;秋、冬季混合层高度2003年前呈微弱降低趋势,之后呈先下降后升高趋势(图5b),说明其自身年代际波动对*A*值的影响较大。夏季降水最多、年际变率大,秋季和春季降水次之、年际变率相对较小,冬季降水异常少,无明显年际变化,表明降水对宁夏*A*值年代际变化无显著影响(图5c)。

各地春冬季风速较大,夏秋季较小;惠农、中宁、同心、海原风速较大,而银川、吴忠及西吉风速相对较小(图6a)。春冬季风速与*A*值相关性最高,多数通过了$P\leqslant0.05$的显著性水平检验;在石嘴山、

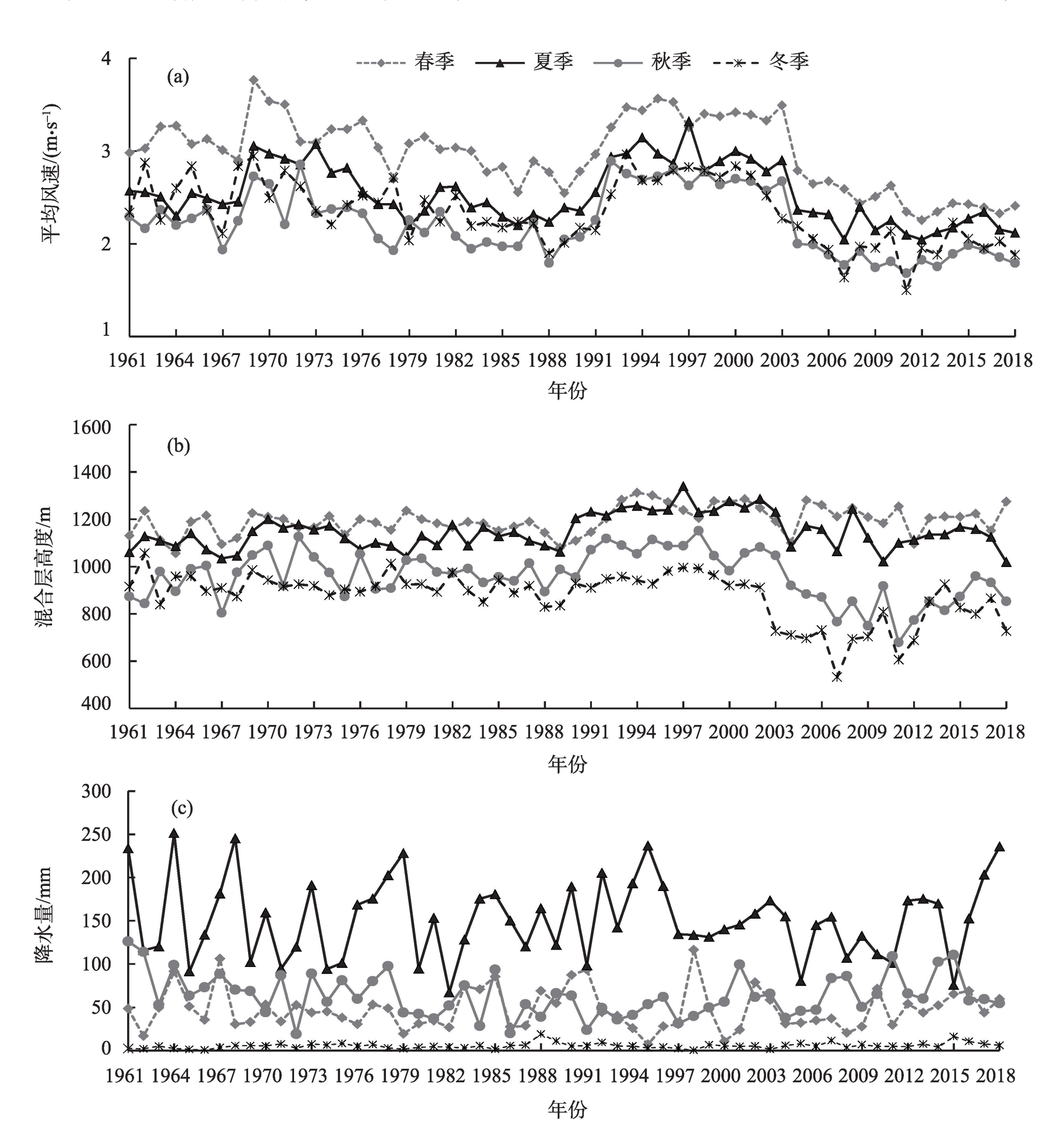


图5　1961—2018年宁夏平均风速(a)、混合层高度(b)、降水量(c)变化

Fig. 5　Changes of average wind speed (a), mixed layer height (b) and precipitation (c) in Ningxia from 1961 to 2018

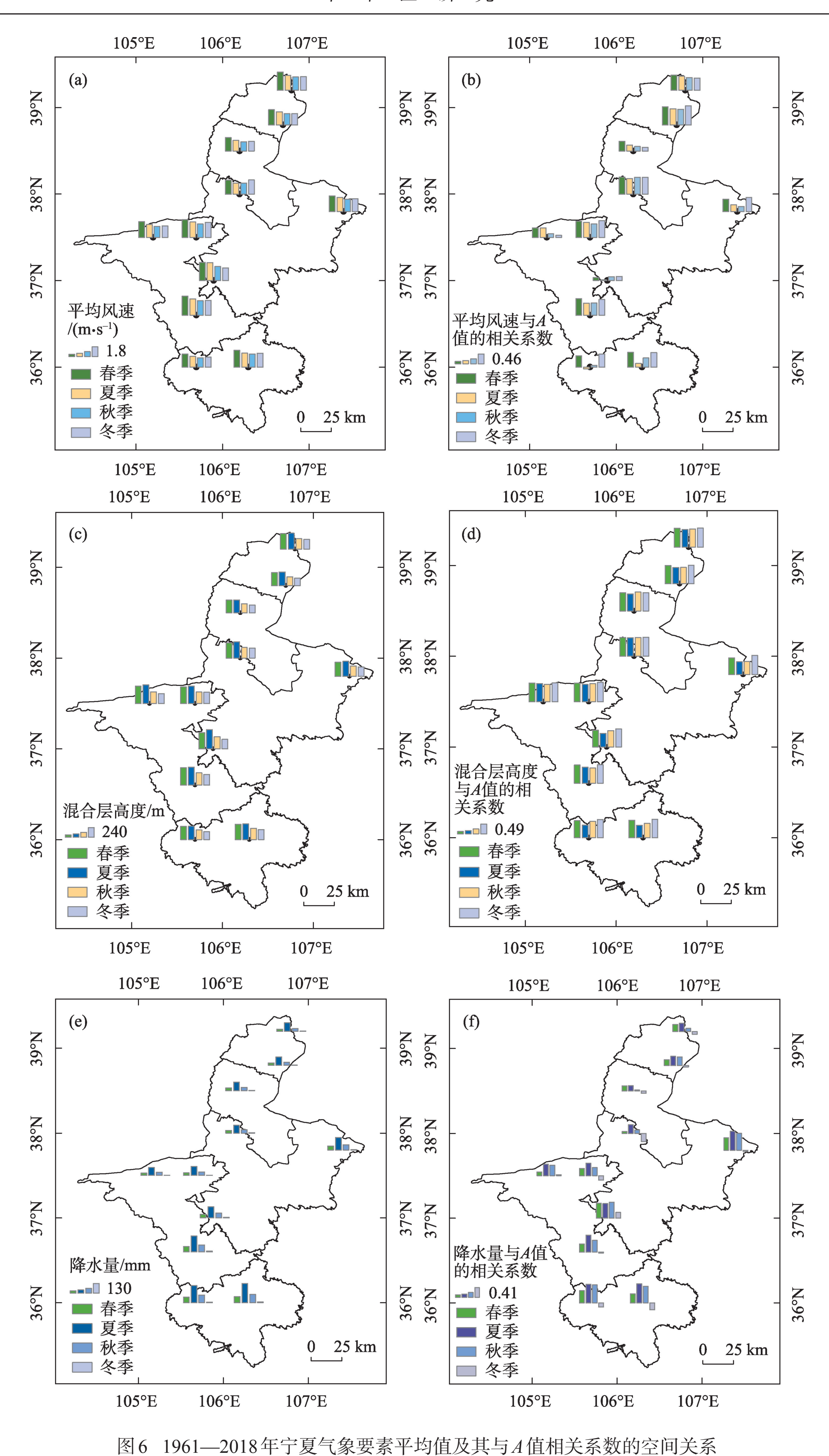


图6 1961—2018年宁夏气象要素平均值及其与*A*值相关系数的空间关系

Fig. 6 The spatial histogram of the average values of meteorological elements and their correlation coefficients with *A* values in Ningxia from 1961 to 2018

陶乐、吴忠、中宁两者间四季均存在显著正相关关系,而在盐池、海原、西吉、固原仅在春冬季存在显著相关关系(图6b)。由此可知,不同地区各季节风速对*A*值的影响存在明显差异。各地混合层高度春、夏季较高,秋冬季较低(图6c),各季节混合层高度与*A*值均存在显著正相关关系(通过了$P \leq 0.01$的显著性水平检验),相关系数在0.6以上(图6d),即混合层高度季节变化对*A*值影响较大,混合层高度越高(低)的季节,*A*值越大(小)。宁夏夏季降水量最多,约占年降水量的60%左右,空间分布上从南到北依次减少(图6e)。各地降水量与*A*值间相关系数时空差异明显,北部的惠农、银川、吴忠仅夏季相关性显著(通过$P \leq 0.05$的显著性水平检验),中南部的盐池、同心、海原、固原、西吉则是春夏秋季均存在显著相关(图6f)。可以看出,降水量对*A*值的影响在北部干旱地区是夏季较大,在中南部地区是春夏秋均较大。

春秋季风速和混合层高度在吴忠、银川、石嘴山等地的贡献率在80%以上(图7),表明大气湍流输送扩散是决定北部春秋季*A*值大小的主要因子;春季降水量的贡献率在盐池、同心、西吉等地比风速大,说明在中南部地区混合层高度和降水量是决

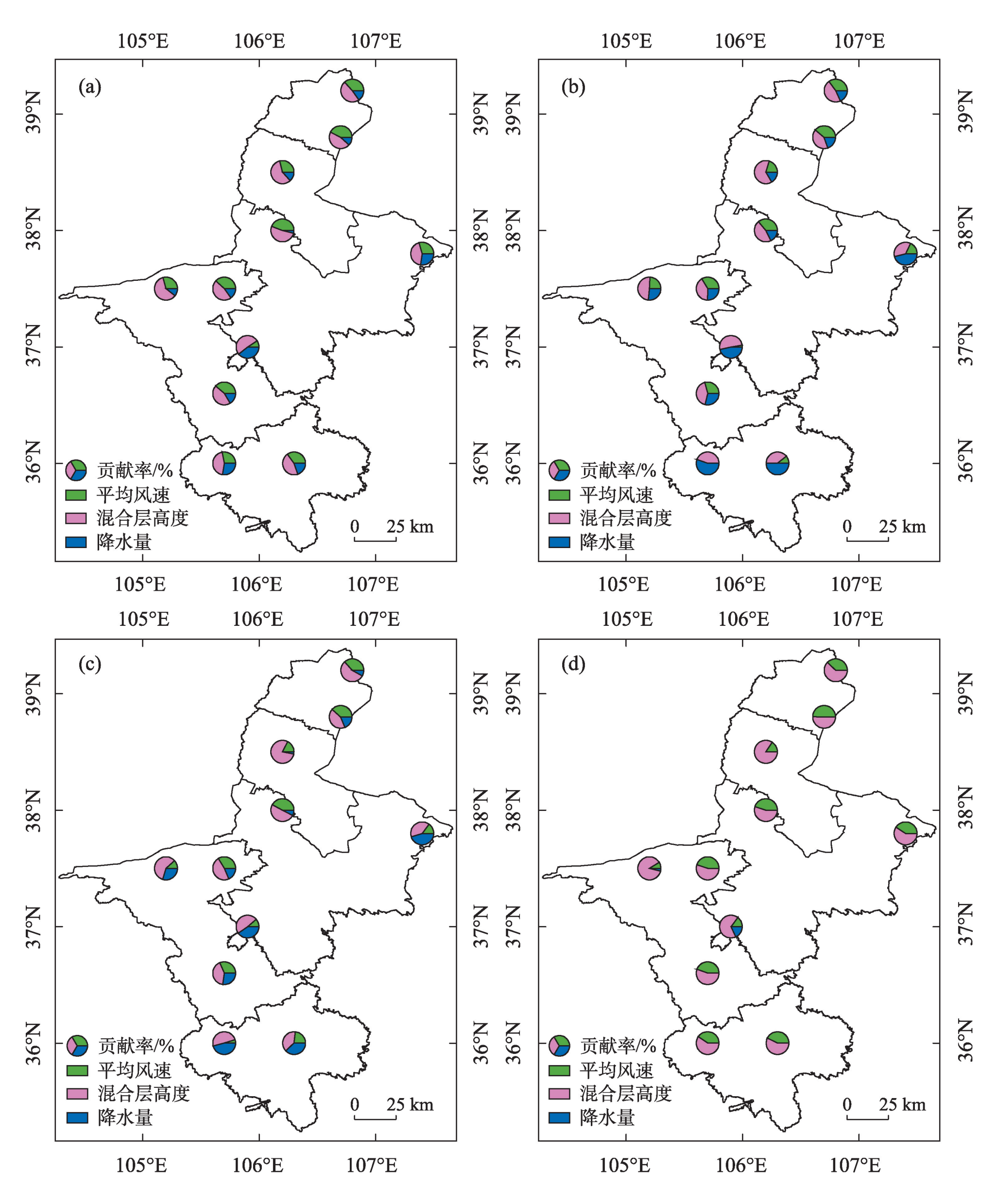


图7　1961—2018年宁夏春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)季气象要素对*A*值的贡献率

Fig. 7　Contribution rate of spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d) meteorological elements to *A* value in Ningxia from 1961 to 2018

定春秋季A值的重要因子。夏季北部地区混合层高度对A值的贡献最大,降水量和风速次之且贡献大小相当;在中南部地区则是混合层高度和降水量对夏季A值的贡献较大,尤其在盐池、同心、西吉、固原降水量的贡献接近一半甚至以上(图7b)。冬季各气象要素对宁夏各地A值的贡献率由大到小为:混合层高度、风速和降水量(图7d)。在年代际尺度上,各地春夏季混合层高度无明显变化趋势,秋冬季呈显著降低趋势(图略),与A值的变化趋势较为一致。北部地区春秋季风速越大,对A值的贡献越大;中南部地区夏秋季降水越多,对A值的贡献越大。

2.3 大气环境容量合理性及剩余量估算

根据《环境空气质量标准》(GB3095—2012)二级标准,对计算出的大气环境容量合理性及其剩余量进行分析估算。由表1可知,2018年五市城区环境空气质量监测点SO_2年平均浓度为0.009~0.041 mg·m^{-3},未超过SO_2浓度二级标准(0.06 mg·m^{-3}),说明SO_2尚有环境余量。各市SO_2排放量为0.54×10^4~3.73×10^4 t,石嘴山最高,吴忠最低。除石嘴山外,其他各市SO_2环境容量余量为0.69×10^4~9.20×10^4 t,满足《环境空气质量》(GB3095—2012)浓度界限值要求,表明计算的大气环境容量是合理的。由于2013年后大武口站缺少云量观测造成了一定的不确定性,利用SO_2浓度及排放量数据计算的石嘴山市环境容量余量结果出现负值,也是基本合理的。各市NO_x排放量为0.13×10^4~1.72×10^4 t,剩余容量为0.20×10^4~8.24×10^4 t。剩余容量固原市最多,银川市最少。

由大气环境SO_2承载力区划评价结果可知(图8a),2018年平罗县和利通区为临界超载,银川市城区为中等承载,其余各地为高承载;就NO_x承载力而言(图8b),惠农区属于临界超载,平罗县和利通区

表1 2018年宁夏地级市城区SO_2和NO_x实际排放量与环境容量

Tab. 1 Actual emission and environmental capacity of SO_2 and NO_x in urban areas of Ningxia prefecture-level cities in 2018

/10^4 t

地区	SO_2			NO_x		
	环境容量	实际排放量	余量	环境容量	实际排放量	余量
银川	1.41	0.72	0.69	1.18	0.98	0.20
石嘴山	2.74	3.73	−0.99	2.28	1.72	0.56
吴忠	2.91	0.54	2.37	2.42	0.46	1.96
中卫	8.16	1.37	6.79	6.80	0.83	5.97
固原	10.05	0.85	9.20	8.37	0.13	8.24

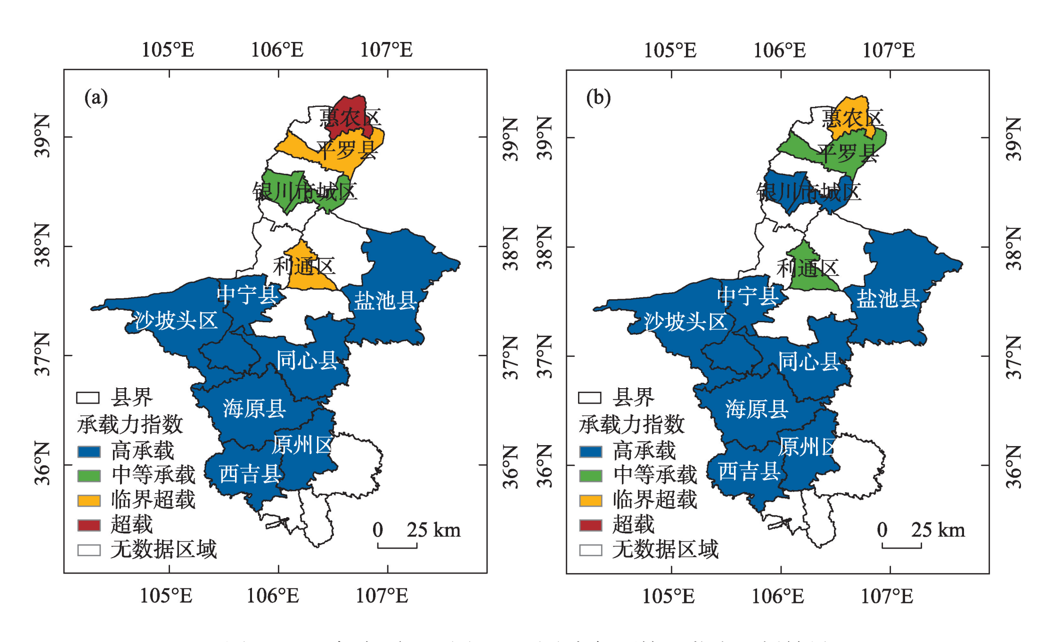


图8 2018年宁夏SO_2(a)、NO_x(b)大气环境承载力区划结果

Fig. 8 Zoning results of SO_2 (a) and NO_x (b) atmospheric environmental carrying capacity in Ningxia in 2018

属于中等承载,其余各地为高承载。以冶金、火电、化工、建筑等高耗能产业和车辆SO_2、NO_x排放总量、强度较大是上述县区环境容量超载、临界超载的主要原因。利通区以南各地大气环境SO_2、NO_x剩余容量较大。在自然因素不变条件下,若SO_2排放量惠农区能减少0.63×10^4 t,新增排放量平罗县、利通区和银川市城区分别控制在0.16×10^4 t、0.50×10^4 t和0.23×10^4 t以内,新增NO_x排放量惠农区、平罗县和利通区若分别能控制在0.17×10^4 t、1.47×10^4 t和0.86×10^4 t以内,近段时间宁夏将暂无SO_2和NO_x减排压力。

3 结 论

(1) 近60 a宁夏四季大气环境容量A值总体呈减小趋势,速率为-0.47×10^4~-0.24×10^4 $km^2\cdot(10a)^{-1}$,且秋冬季最显著。各季节A值夏季最大(4.7×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$),春季次之(3.0×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$),秋季(2.3×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$)和冬季(1.1×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$)较小。A值总体呈南高北低的空间分布特征。全区春夏秋季A值分别为1.8×10^4~4.3×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$、2.1×10^4~8.0×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$、1.1×10^4~3.5×10^4 $km^2\cdot a^{-1}$;受贺兰山、六盘山地形及区域降水量等因素影响,A值低值中心位于银川和石嘴山市,高值中心位于固原市南部地区。

(2) 风速和混合层高度变化对宁夏大气环境容量A值年代际演变趋势具有决定影响,降水量对A值的年际变率具有一定影响。大部分地区A值与混合层高度存在显著正相关关系;降水量和风速对A值的影响存在明显季节和地区差异,风速对北部各地春季A值贡献较大,降水对中南部各地夏秋季A值的贡献较大。

(3) 2018年宁夏各市SO_2排放量为0.54×10^4~3.73×10^4 t。除石嘴山外,其他各市SO_2环境容量余量为0.69×10^4~9.20×10^4 t;NO_x排放量为0.13×10^4~1.72×10^4 t,剩余容量为0.20×10^4~8.24×10^4 t。受冶金、火电、化工、建筑等高耗能产业和车辆排放影响,平罗县和利通区属于宁夏大气环境SO_2、NO_x临界及超载区,利通区以南各地为高承载区。

(4) 要进一步改善宁夏整体大气环境质量,惠农区应减少SO_2排放量0.63×10^4 t以上,并将新增NO_x排放量控制在0.17×10^4 t以内,平罗县新增SO_2排放量控制在0.16×10^4 t以下,其他地区新增SO_2和NO_x排放量亦需控制在48%以内。

参考文献(References):

[1] 刘鸿亮, 缪天成, 杨本津, 等. 环境容量、背景值赴日考察团考察报告[J].环境科学动态, 1983(增刊2): 1−8. [Lui Hongliang, Liao Tiancheng, Yang Benjin, et al. Environmental capacity and background value investigation report of the investigation mission to Japan [J]. Trends in Environmental Science, 1983(Suppl. 2): 1−8.]

[2] Karen M M, Lawrence C, Marvin P O, et al. A comparison of box and plume model calculations for sulphur deposition and flux in Alberta, Canada[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(17): 2969−2980.

[3] Goyal S K , Chalapati Rao C V. Air assimilative capacitybased environment friendly siting of new industries-A case study of Kochi region, India[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 84 (4): 473−483.

[4] Gene D D, Yesilyurt C, Tuncel G. Air pollution forecasting in Ankara, Turkey using air pollution index and its relation to assimilative capacity of the atmosphere[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 166(1−4): 11−27.

[5] Ritter M, Müller M D, Tsai M Y, et al. Air pollution modeling over very complex terrain: An evaluation of WRF-Chem over Switzerland for two 1-year periods[J]. Atmospheric Research, 2013, 132 (5): 209−222.

[6] 李达, 蒋家文, 陈波洋, 等. 社区大气污染物排放总量控制研究[J]. 环境科学, 1999, 20(5): 100−104. [Li Da, Jiang Jiawen, Chen Boyang, et al. Study on the total emission control of atmospheric pollutants in Urban district[J]. Environmental Science, 1999, 20 (5): 100−104.]

[7] 许艳玲, 薛文博, 王金南, 等. 大气环境容量理论与核算方法演变历程与展望[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11): 1835−1840. [Xu Yanling, Xue Wenbo, Wang Jinnan, et al. Development and prospect of atmospheric environment capacity theory and accounting method[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(11): 1835−1840.]

[8] 徐大海, 朱蓉. 我国大陆通风量及雨洗能力分布的研究[J]. 中国环境科学, 1989, 9(5): 367−374. [Xu Dahai, Zhu Rong. A study on the distribution of ventilation and rainout capacity in mainland China[J]. China Environmental Science, 1989, 9(5): 367−374.]

[9] 徐大海, 朱蓉, 潘在桃. 城市扩散模式与二氧化硫排放总一控制环境的研究[J]. 中国环境科学, 1990, 10(4): 309−313. [Xu Dahai, Zhu Rong, Pan Zaitao. The studies on standard of emission of SO_2 and dispersion model in cities[J]. China Environmental Science, 1990, 10(4): 309−313.]

[10] 徐大海, 王郁, 朱蓉. 大气环境容量系数A值频率曲线拟合及其应用[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 2913−2922. [Xu Dahai, Wang Yu, Zhu Rong. The atmospheric environmental capacity coefficient cumulative frequency curve fitting and its application[J].

China Environmental Science, 2016, 36(10): 2913-2922.]

[11] 安兴琴, 陈玉春, 吕世华. 兰州市冬季SO_2大气环境容量研究[J]. 高原气象, 2004, 23(1): 110-115. [An Xingqin, Chen Yuchun, Lü Shihua. Study on SO_2 atmospheric environmental capacity in Lanzhou winter[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(1): 110-115.]

[12] 孙文杰. 基于WRF/CALMET模拟的兰州新区大气环境容量研究[J]. 环境影响评价, 2021, 43(3): 61-66. [Sun Wenjie. Research on atmospheric environment capacity of Lanzhou new area based on WRF/CALMET simulation[J]. Environmental Impact Assessment, 2021, 43(3): 61-66.]

[13] 朱蓉, 张存杰, 梅梅. 大气自净能力指数的气候特征与应用研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3601-3610. [Zhu Rong, Zhang Cunjie, Mei Mei. The climate characteristics of atmospheric self-cleaning ability index and its application in China[J]. China Environmental Science, 2018, 38(10): 3601-3610.]

[14] 陆琛莉, 李海军, 张雪慧, 等. 2013年12月浙北北部两次重度霾过程的对比分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(1): 47-55. [Lu Chenli, Li Haijun, Zhang Xuehui, et al. Comparative analysis on two severe hazes happened in December 2013 in the north part of northern Zhejiang[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2018, 41(1): 47-55.]

[15] 王颖, 梁依玲, 王丽霞. 气象条件对污染物浓度分布影响的研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(2): 69-74. [Wang Ying, Liang Yiling, Wang Lixia. Research on the impact of meteorological field on the spatial distribution of the pollutant concerntration[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2015, 9(2): 69-74.]

[16] 吴序鹏, 刘端阳, 谢真珍, 等. 江苏淮安地区大气污染变化特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(1): 31-38. [Wu Xupeng, Liu Duanyang, Xie Zhenzhen, et al. Change characteristics and relationship with meteorological conditions of atmospheric pollution in Huai'an[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2018, 41(1): 31-38.]

[17] 陈渤黎, 雷正翠, 董芹, 等. 2012—2014年常州市大气重污染日的气象条件分析[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 87-94. [Chen Boli, Lei Zhengcui, Dong Qin, et al. Analysis of the meteorological conditions in serious air pollution days in Changzhou from 2012 to 2014[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2017, 40(1): 87-94.]

[18] 郭立平, 乔林, 石茗化, 等. 河北廊坊市连续重污染天气的气象条件分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(3): 497-504. [Guo Liping, Qiao Lin, Shi Minghua, et al. Analysis about meteorological conditions of continuous heavy pollution episodes in Langfang of Hebei Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(3): 497-504.]

[19] 刘子龙, 代斌, 崔卓彦, 等. 大气污染物浓度变化特征及潜在源分析——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 562-569. [Liu Zilong, Dai Bin, Cui Zhuoyan, et al. Concentration characteristics and potential source of atmospheric pollutants: A case study in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 562-569.]

[20] 杨云芸, 李跃清, 周慧, 等. 长沙市API指数时空变化特征及气象条件影响[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 108-113. [Yang Yunyun, Li Yueqing, Zhou Hui, et al. Spatial-temporal variation characteristics of air pollution index and effects of meteorological condition in Changsha[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2017, 40(1): 108-113.]

[21] 刘强. 大气污染物扩散中稳定度判定方法概述[J]. 干旱气象, 2011, 29(3): 355-361. [Liu Qiang. Summary of methods about determination of atmospheric stablibity in environmental impact assessment[J]. Journal of Arid Meteorology, 2011, 29(3): 355-361.]

[22] 李博, 王颖, 张稼轩, 等. 河谷城市通风系数研究[J]. 环境科学研究, 2018, 31(8): 1382-1388. [Li Bo, Wang Ying, Zhang Jiaxuan, et al. Ventilation coefficient in river valley terrain[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(8): 1382-1388.]

[23] 赵德山. 城市大气污染总量控制方法手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991. [Zhao Deshan. Handbook on the Total Quantity Control of Urban Air Pollution[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1991.]

[24] 樊杰. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2022. [Fan Jie. Guidelines for Assessment Methods of Resources and Environment Carrying Capacity and Land and Space Development Suitability[M]. Beijing: Science Press, 2022.]

[25] 刘龙华, 汤小华, 陈加兵. 福建省大气环境承载力研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(4): 31-39. [Liu Longhua, Tang Xiaohua, Chen Jiabing. A research on bearing capacity of atmospheric environmental in Fujian Province[J]. Journal of Subtroptical Resource and Environmental, 2013, 8(4): 31-39.]

Atmospheric environmental capacity characteristics and influencing factors of Ningxia over the past 60 years

CUI Yang[1,2], WANG Dai[1,2], GAO Ruina[1,2], AN Xingqin[3]

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. Institute of Atmospheric Composition, Chinese Research Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This study has aimed to evaluate the characteristics of the atmospheric environmental capacity and its influencing factors in Ningxia. The temporal and spatial distribution of the *A* value of the atmospheric environmental capacity and its main meteorological influencing factors were analyzed using daily fixed time historical observation data from meteorological stations between 1961 and 2018, based on the box model principle. The atmospheric environmental capacity in 2018 was also evaluated and zoned. The results showed that the *A* value of the atmospheric environmental capacity showed a decreasing trend in all seasons, with a rate of -0.47×10^4~-0.24×10^4 $km^2\cdot(10a)^{-1}$. The annual average *A* value was largest in the summer, followed by the spring, and then autumn and winter. The monthly *A* value showed a single peak pattern, with a maximum in August and minimum in December. It was generally high in the south and low in the north in space, and influenced by the topography of Helan Mountain and Liupan Mountain, regional precipitation, and other climatic factors. The low value center for *A* was located in Yinchuan and Shizuishan City, while the high value center was located in the south of Guyuan City. Wind speed and mixed layer height changes had a significant influence on the interdecadal evolution trend of the atmospheric environmental capacity of *A* in the Ningxia Hui Autonomous Region. There were obvious seasonal and regional differences on the impacts of precipitation and wind speed. For example, wind speed had a greater contribution to the *A* value in spring in the north, and precipitation had a greater contribution to the *A* value in summer and autumn in the south. This was affected by high energy consuming industries such as metallurgy, thermal power, the chemical industry, and construction and vehicle emissions. Pingluo County and Litong District were the critical overload and overload areas for the SO_2 and NO_x atmospheric environments, and the counties south of Litong District were high bearing areas in Ningxia.

Keywords: atmospheric environmental capacity; atmospheric environmental carrying capacity index; meteorological influence factors; remaining capacity；Ningxia